

# 天文光学

## 家 正 則

### 1. 20世紀までの流れ

17世紀の初めにガリレオ・ガリレイが直径3cm程度の屈折望遠鏡で初めて天体観測を行ってから、およそ400年になろうとしている。この間、色消しレンズの発明、写真乾板の利用、メッキ法による鏡の反射率の向上などの技術革新があり、望遠鏡は次第に大型化した。望遠鏡の大型化は1948年に完成したパロマー山の5m反射望遠鏡でいったん頂点に達した。望遠鏡本体の光学系、関連して必要となる広視野補正光学系、大気分散補正光学系、天体分光器などについても、20世紀後半にさまざまな発展があった<sup>1-3)</sup>。その後1980年代までは、電子技術や半導体アレイ検出器技術の発展による光検出器の高感度化が最大の進歩であった。写真乾板に比べて量子効率が約50倍もあり、感度校正の再現性のよいCCD素子の実用化により、観測限界が大幅に広がった(図1)<sup>4)</sup>。もうひとつの大きな流れは、観測波長域の拡大である。1930年代ごろまで、天文学といえば可視光での観測を指していた。その後、電波望遠鏡の実用化により、地上から観測できる電磁波のもうひとつの窓が開いた。気球、ロケットや人工衛星が上がるようになると、X線、紫外線や赤外線など地球大気外からでなければできない観測も可能となり、宇宙の新しい側面がみえてきた(図2)。21世紀に入り、100m級超大型望遠鏡の構想や、次世代宇宙望遠鏡などさまざまな宇宙望遠鏡の計画が推進されようとしており、天文学関連の光学技術の発展は今後ますます加速されると期待される。

### 2. CCD 検出器の革新

光検出器としてのSi-CCD素子についても、最近の進歩は著しい。1986年に東京大学東京天文台岡山天体物理観測所で最初に実用化した液体窒素冷却型CCDは画素数が $320 \times 256$ だったが、現在すばる望遠鏡で使用している主焦点カメラでは $4000 \times 2000$ 画素のCCDを $2 \times 5$ 個モザイク状に並べて、合計 $8000 \times 10000$ 画素の検出器とした。すきまをなるべく小さくするため、読み出し回路を一辺に集

め、三辺は縁まで感光部となる構造である。屈折率の大きいシリコン基盤では表面反射による損失が無視できなかつたが、最近では反射防止膜技術の導入で感度損失を低減する工夫がなされてきた。また、長波長域の感度を向上させることができる高抵抗型のCCDの実用化も、大いに期待されている。素子の大型化は歩留まりとの戦いであり、天文学界は半導体メーカーに目標仕様を提示し、試作品の性能評価を行うというギブ・アンドテイクが、世界的に行われている。

シリコン半導体技術の進歩はシリコン以外の複合半導体にも受け継がれ、波長 $1 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ の近赤外線用に、バンドギャップの小さいHgCdTeやInSbなどを用いたさまざまな固体撮像素子が1990年代に入り実用化された。真空や冷却の技術を要するという面では、可視光と赤外線の観測で必要な技術が共通になってきた。天文学の世界では、Si-CCDが使える $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下を可視光、検出器が替わる $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上を赤外線とよんでいる。X線天文観測にもCCDが使われるようになったが、この場合個々のX線光子のエネルギーを各イベントの光電子数から求めることができる。撮像素子としての機能に加えて分光機能をも備えた光検出器として利用できる。可視光や赤外線でも、トンネル接合素子(STJ)を多数並べた検出器を実用化するための基礎開発が始まっている。

### 3. 能動光学と補償光学

1990年代にもうひとつ大きな技術革新があった。それは光の波面を制御する技術の実用化である。日本のすばる望遠鏡などでは、主鏡の鏡面形状を実時間制御する能動光学技術の開発により、従来は不可能であった超大型望遠鏡の建設が実現した(図3)。すばる望遠鏡では、直径8.2m、厚さ20cm、重さ23トンの超低膨張ガラスを3年半かけて精密研磨し、鏡面の残存誤差を12nm(0.02波長)にまで仕上げた。一枚鏡としては世界最大・最高精度の鏡である。能動光学方式とは、鏡を支える261個のアクチュエー

ターの支持力度をコンピューターで制御することにより、常に理想の回転双曲面形状に保つという方式である<sup>5)</sup>。望遠鏡の姿勢などに応じて支持力の指令値を刻々と変化させるが、この方式で正しく鏡面を制御できているか、ときどき実際に無限遠の恒星を光源として精密な波面測定装置を用いて確認し、制御モデルを微調整する。すばる望遠鏡では1時間の露出で28等級の天体が見えることが確認された。これらは肉眼で見える一番暗い星(6等級)の7億分の1というかすかな天体で、実際には宇宙の奥深くにある銀河である。遠くの銀河を見ることは昔の銀河を見ることになるので、宇宙の進化や構造を調べることができるようになった。

能動光学技術をさらに発展させて小型化高速化し、地球大気の温度ゆらぎに起因する光波面の擾乱を実時間制御して、望遠鏡の回折限界の解像力を実現する技術を補償光学とよぶ<sup>6)</sup>。波面センサーとして、波面曲率分布測定装置(曲率センサー)あるいは波面傾斜分布測定装置(シャック・ハルトマンセンサー)により大気のゆらぎを1kHz程度で測定し、これを補償するピエゾ駆動の「可変形状鏡」を用いて、天体像をシャープにする実験が実用段階に入ってきた(図4)。補償光学では大気のゆらぎを瞬時に測定する必要があるため、明るい恒星が必要となる。任意の天域で補償光学を実用化するため、地上からレーザービームを打ち、高度90kmの上層大気中のナトリウム層を照射励起して

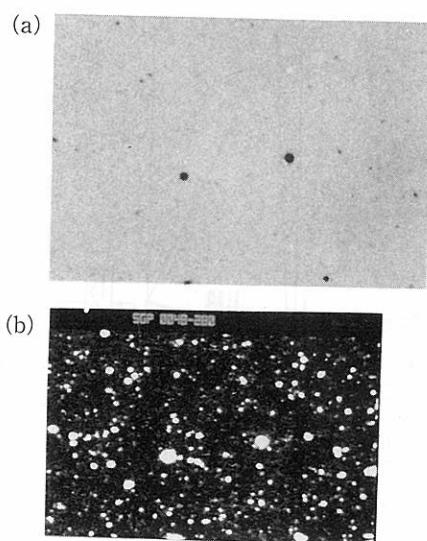


図1 (a) 写真乾板と (b) CCD の感度の違い (A. Tyson, AJ, 96, 1 1988)。

光らせて人工星(レーザーガイド星)を複数つくり、大気擾乱を立体的に補償する構想なども検討されている(図5)。

これらの技術開発を見越して、2020年ごろの完成をめどに、さらに巨大な望遠鏡を建設しようという構想がある。一番野心的な構想では、直径100m、高さ130mの能動光学望遠鏡に高度補償光学システムを組み込んで、解像力1ミリ秒角、限界等級38等を実現する可能性が検討されて

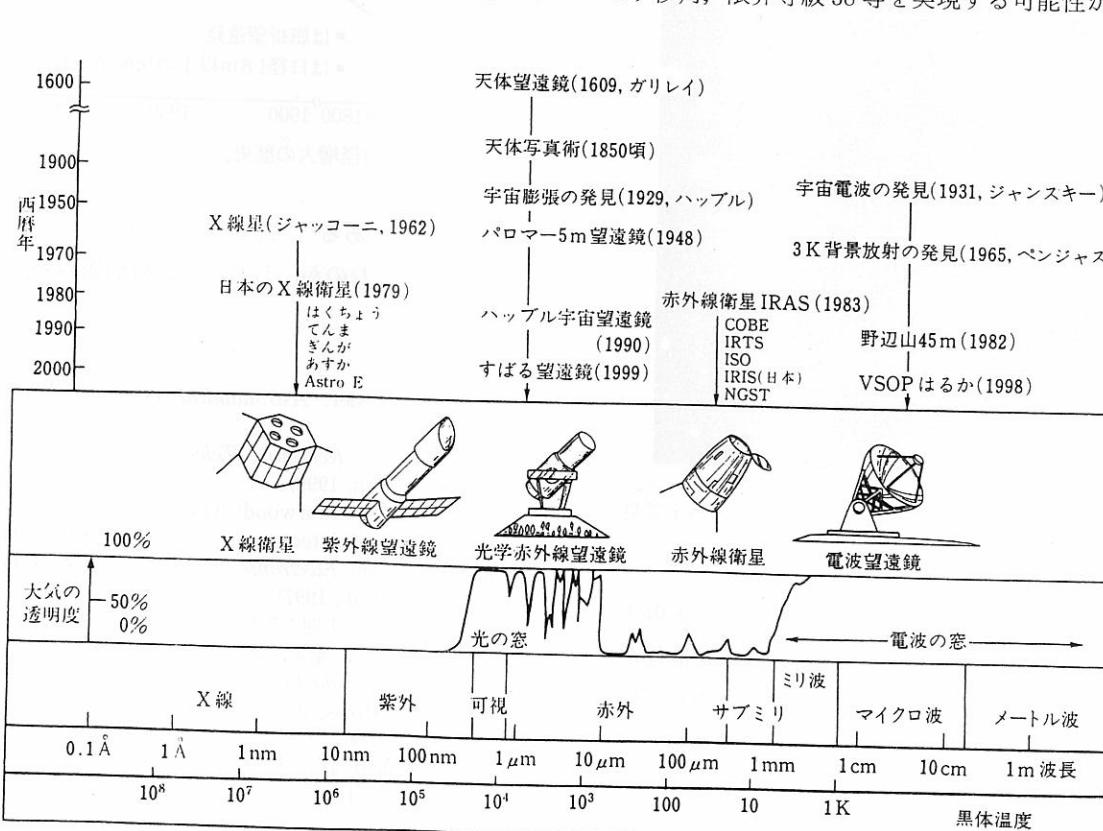


図2 大気の透明度の波長依存性と観測手段。

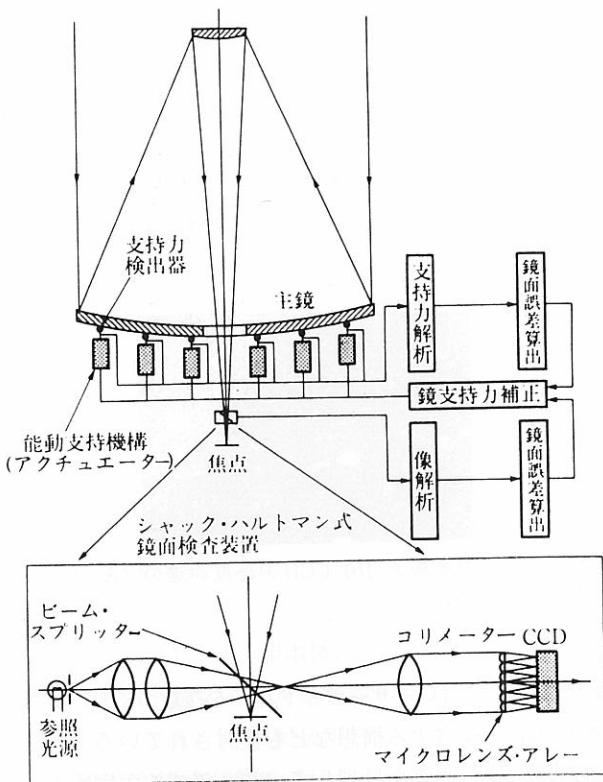


図3 すばる望遠鏡の主鏡能動光学方式の原理。

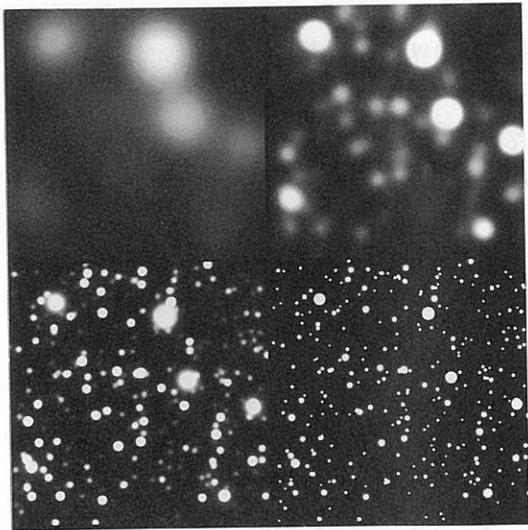


図4 補償光学による解像度改善効果のシミュレーション。星像がシャープになるに従って、より多くの暗い天体まで見えるようになる。

いる(図6)。このような望遠鏡が2020年ごろに実現すると、太陽系以外の惑星系の直接観測が実現する可能性がある。お隣のアンドロメダ銀河中の星をすべて分離して観測することができ、宇宙の果ての最初の超新星爆発もとらえることもできるはずである<sup>7)</sup>。

地上設置の超大型望遠鏡や宇宙空間に打ち上げる天文観測衛星など、世界中の天文学者がアイディアを競い、その



図5 レーザーガイド星生成実験 (Maxime Bocca, CTIO/NOAO/AURA/NSF)。

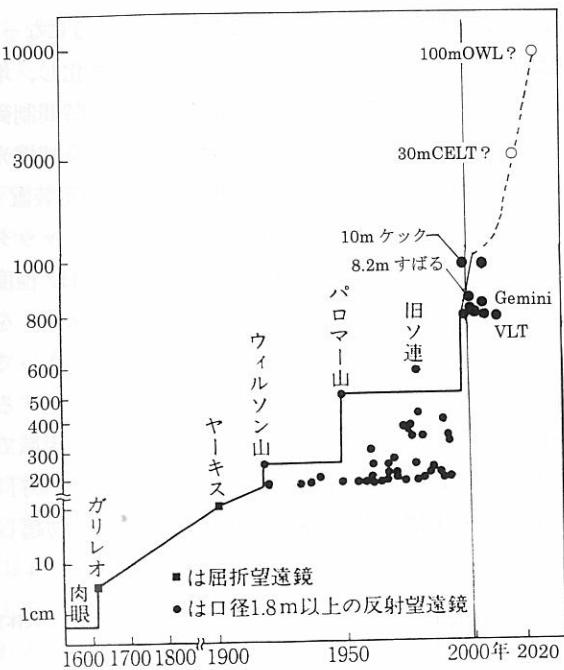


図6 望遠鏡口径増大の歴史。

実現に努力中である<sup>8)</sup>。21世紀の最初の20年で宇宙の理解がどこまで進むのか、おおいに期待が膨らむ。

## 文 献

- 1) D. J. Schroeder: *Astronomical Optics* (Academic Press, 1987).
- 2) R. N. Wilson: *Reflecting Telescope Optics I, II* (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- 3) M. Iye and A. Moorwood: "Optical and IR telescope instrumentation and detectors," Proc. SPIE, **4008** (2000).
- 4) I. S. McLean: *Electronic Imaging in Astronomy* (Praxis Publishing Ltd., 1997).
- 5) 大坪政司, 家 正則: "ファーストライ特を迎えた8メートルすばる望遠鏡", 光学, **28** (1999) 192-201.
- 6) F. Roddier: *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge University Press, 1999).
- 7) 家 正則: "すばる望遠鏡とその良きライバルたち", 学術月報, **53** (2000) 484-490.
- 8) 吉岡一男: 宇宙の観測 (放送大学教育振興会, 2001) pp. 163-175.